

Наблюдение колебаний плотности плазмы с помощью СВЧ-интерферометра Т-15МД

© А.С. Дрозд,^{1,2} Е.А. Виноцкий,^{1,2} Д.С. Сергеев,¹ А.М. Белов,¹ Л.Г. Елисеев,¹ К.А. Рогозин^{1,3}

¹ Научно-исследовательский центр „Курчатовский институт“, 123182 Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 115409 Москва, Россия

³ Национальный исследовательский университет „МЭИ“, 111250 Москва, Россия
e-mail: drozd_as@nrcki.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 21 ноября 2025 г.

Принято к публикации 26 ноября 2025 г.

Показаны возможности применения СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД для наблюдения и анализа параметров колебаний плотности плазмы. Представлены результаты первых экспериментов по измерению колебаний линейной плотности плазмы на токамаке Т-15МД. С помощью СВЧ-интерферометра зафиксированы низкочастотные МГД-возмущения, в том числе пилообразные колебания. Показано, что амплитуда сигнала СВЧ-интерферометра может нести дополнительную информацию о плазменных возмущениях.

Ключевые слова: токамак, амплитудные эффекты, пилообразные колебания, низкочастотные моды.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62653.265-25

Введение

Одной из ключевых задач физики высокотемпературной плазмы является изучение процессов переноса частиц и энергии. Экспериментальные исследования показывают, что в тороидальных установках, таких как стелларатор и токамак, коэффициенты переноса значительно превышают предсказания неоклассической теории плазмы [1]. Считается, что причиной такого аномального переноса является развитие мелкомасштабных неустойчивостей в плазме, турбулентностей. Проведение экспериментов по измерению плазменных колебаний и определению их характеристик позволит расширить экспериментальную базу данных и в перспективе углубить понимание механизмов турбулентного переноса. Одним из основных методов анализа турбулентности является измерение колебаний электронной плотности в токамаках с помощью различных диагностик [2–4]. Одной из таких диагностик является интерферометрия.

Методы интерферометрии активно применяются для измерения электронной плотности плазмы. Электромагнитная волна, проходя через плазму, приобретает дополнительный фазовый набег, который при зондировании на обыкновенной волне и при $\omega \gg \omega_p$ (где ω — частота электромагнитной волны, ω_p — плазменная частота) можно считать пропорциональным линейной электронной плотности плазмы [5]:

$$\Delta\varphi = -r_e\lambda \int_L n_e(l)dl, \quad (1)$$

где r_e — классический радиус электрона, λ — длина электромагнитной волны, интеграл плотности вдоль хор-

ды зондирования далее будет обозначаться как nl . Таким образом, выходными данными с интерферометрической диагностики являются интегральные значения nl (или линейная плотность) [5].

Основными задачами интерферометрии плазмы на токамаках являются:

- 1) измерение и контроль средней величины электронной плотности $\langle n \rangle$;
- 2) восстановление радиального распределения $n(r)$ по сечению плазменного шнура.

Тем не менее зачастую применение интерферометров в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, имеющих высокую чувствительность к плотности плазмы и высокое временное разрешение проводимых измерений, позволяет наблюдать малые ($\delta nl/nl \sim 0.1\%–1\%$) колебания хордовой плотности плазмы nl . Анализ подобных измерений проводился на других токамаках. Были обнаружены:

- 1) низкочастотные МГД колебания ($f \sim 1–10$ kHz) [6–10], в том числе пилообразные колебания и тиринг-моды [9], а также внутренняя кинк-мода [10];
- 2) высокочастотные колебания в диапазоне $f \sim 100–200$ kHz [11,12] с детектированием альфвеновских каскадов [4].

Из предыдущих работ [4,10] видно, что при измерении колебаний плотности целесообразно рассматривать не только восстановленный сигнал фазы (линейной плотности), но и амплитуду регистрируемого интерферометром сигнала, поскольку процессы, происходящие в плазме, например, отклонение луча из-за рефракции [13] и поворот плоскости поляризации из-за эффекта Фарадея [14],

приводит к изменению мощности, приходящего на детектор зондирующего излучения, позволяя наблюдать локальные изменения n .

Настоящая работа посвящена применению СВЧ-интерферометра в качестве инструмента для наблюдения колебаний электронной плотности плазмы. В настоящей работе приведена оценка операционных пределов СВЧ-интерферометра для наблюдения колебаний, а также представлены результаты измерений параметров колебаний электронной плотности, выполненные с использованием СВЧ-интерферометра на токамаке Т-15МД.

1. Экспериментальная установка и используемое оборудование

Токамак Т-15МД [15] выводится на проектные параметры в НИЦ „Курчатовский институт“: большой радиус $R = 1.48$ м, малый радиус $a = 0.67$ м, ток плазмы I_p до 2 МА, тороидальное поле на оси B_T до 2 Т, плотность плазмы $\langle n \rangle$ до 10^{20} м⁻³. Установка занимает промежуточное положение между сферическими и классическими токамаками (аспектное отношение $A = 2.2$), рассчитана на работу в диверторной конфигурации плазменного шнура с вытянутостью $k_{95} = 1.7-1.9$ и треугольностью $\delta_{95} = 0.3-0.4$. На данный момент были получены плазменные импульсы с длительностью до 2 с, током плазмы до 620 кА, и поддержанием диверторной конфигурации длительностью масштаба 1 с.

Для измерений электронной плотности плазмы токамака Т-15МД используется СВЧ-интерферометр [16] с длиной волны $\lambda = 0.936$ мм с зондированием в вертикальном направлении через центр вакуумной камеры. Временное разрешение в проводимых измерениях $\tau \sim 0.2$ мкс. Для контроля за уровнем плотности в режиме реального времени используется сигнал фазометра, пропорциональный nl . При обработке сигналов в фазометре используется дополнительная фильтрация, что тем не менее не препятствует наблюдению низкочастотных колебаний линейной плотности. В настоящей работе для наблюдения колебаний электронной плотности использовался оцифрованный на частоте $f_s = 50$ МГц сигнал промежуточной частоты (IF, intermediate frequency) $f_{IF} = 5$ МГц и восстановленные из него с помощью фурье методов амплитуда $A(t)$ и линейная плотность $nl(t)$, которые не подвергались дополнительной фильтрации. Сигнал IF представляет собой результат смещения зондирующей и опорной волн СВЧ-интерферометра, а его амплитуда отражает мощность регистрируемого зондирующего излучения.

2. Операционные пределы СВЧ-интерферометра как инструмента измерения колебаний плотности плазмы

Возможность детектирования колебаний плотности с помощью СВЧ-интерферометра ограничена установ-

ленным полосовым фильтром сигнала IF шириной $\Delta f = 300$ kHz, а также уровнем шума. Фильтр имеет резкую характеристику с крутизной границ АЧХ более 200 dB/octave. Наличие полосового фильтра напрямую не приводит к ограничению частот колебаний, которые можно определить из сигнала линейно-интегрированной плотности nl . Поскольку сигнал IF имеет гармоническую форму, он может быть представлен в виде:

$$U_{IF} = A(t) \cos(2\pi f_{IF}t + \Delta\varphi + \varphi_0), \quad (2)$$

где $A(t)$ — амплитуда сигнала, $\Delta\varphi$ — дополнительный набег фазы, вызванный плазмой, φ_0 — набег фазы, вызванный разностью длин плеч интерферометра. Имеющийся фильтр будет подавлять частоты, отстоящие от несущей $f_{IF} = 5$ МГц более чем на $\Delta f/2 = 150$ kHz. Наличие подобных ограничений вызвано изменением во времени фазы сигнала IF из-за наличия изменения $\Delta\varphi/\Delta t$. Таким образом, можно оценить ограничение возможных $\Delta\varphi/\Delta t$, измеряемых интерферометром:

$$\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}\right)_{\max} = 2\pi \frac{\Delta f}{2} = r_e \lambda \frac{\Delta(nl)}{\Delta t}. \quad (3)$$

Предполагая гармоническую зависимость мелкошабного возмущения плотности от времени, можно выразить это возмущение как некоторую добавку к основной величине плотности (nl):

$$nl = (nl)_0 + \delta(nl) \cos(2\pi f t). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), можно оценить частотное ограничение на возможность регистрации СВЧ-интерферометром Т-15МД колебаний плотности m прямым шрифтом.

$$f \leq \frac{1.9 \cdot 10^{17} [\text{m}^{-2}]}{\delta(nl)} \Delta f. \quad (5)$$

Еще одним фактором, ограничивающим область измерения колебаний, является шумовой сигнал интерферометра, который составляет $\sigma_N = 2 \cdot 10^{16}$ м⁻² [16]. Однако при спектральной обработке сравнивать шумовой сигнал с амплитудой колебания напрямую некорректно. Для оценки пороговой амплитуды колебания, при которой еще возможно выделение полезного сигнала на фоне шума, предположим, что наше исходное возмущение является временным сигналом, спектр которого представляется гауссовой формой:

$$S(f) = A \cdot \exp\left(-\frac{(f - f_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

где f — частота колебания, σ — среднеквадратичное отклонение, которое связано с шириной спектра на полувысоте $FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$, A — амплитуда спектра.

Для оценки возможности детектирования малых колебаний плотности был проанализирован фурье-спектр фазового сигнала интерферометра в стационарной стадии разряда без ярко выраженной МГД-активности, который

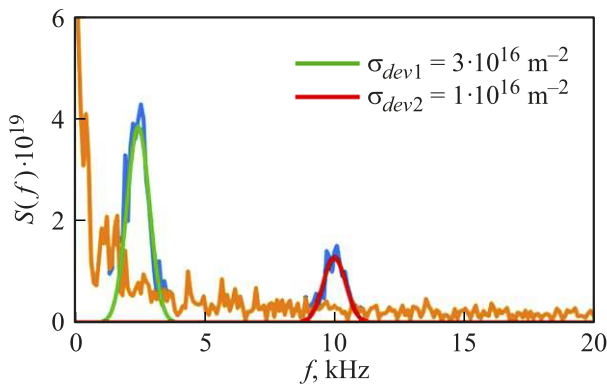


Рис. 1. Фазовый спектр с наложенными колебаниями, имеющими спектр гауссовой формы. Легенда отображает среднеквадратическое отклонение колебаний, пересчитанное в nl .

заметно отличается от спектра этого же сигнала в отсутствие плазмы. Замечено, что спектры такого сигнала изменяются в ограниченном диапазоне для разрядов из разных кампаний Т-15МД, что позволяет применять их для оценок возможности детектирования колебаний.

Учитывая, что большинство наблюдаемых колебаний плотности, зарегистрированных СВЧ-интерферометром Т-15МД, имеют $FWHM < 1$ kHz, воспользуемся этим значением с целью выделить такую амплитуду колебания плотности, которую можно будет однозначно определить на примере спектра фазового сигнала в импульсе № 4515. Спектр сигнала с двумя наложенными искусственными спектрами колебаний представлен на рис. 1. На рисунке оранжевым цветом указан спектр экспериментального сигнала, синим — суммарный спектр с наложенными спектрами колебаний с центральными частотами $f_1 = 2.5$ kHz и $f_2 = 10$ kHz и $FWHM = 1$ kHz. При этом амплитуда для колебания с частотой f_1 взята в 3 раза больше, чем для частоты f_2 , поскольку низкочастотная область (до 2 kHz) спектра экспериментального

сигнала имеет большую интенсивность, что усложняет наблюдение малых по амплитуде колебаний.

Исходя из значения линейной плотности $nl \sim 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$, которому соответствует момент времени, для которого построен спектр сигнала линейной плотности, и двух значений среднеквадратических отклонений колебаний $\sigma_{dev1} = 1 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$, $\sigma_{dev2} = 3 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$ ($\sigma_{dev} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i x_i^2}$, т.е. среднеквадратическое отклонение сигнала во временной области при гауссовом распределении его спектра в частотной области (6)), которые можно явно различить на спектре, можно сделать вывод, что с помощью СВЧ-интерферометра возможно детектировать колебания линейной плотности $\delta(nl)/nl \sim 0.03\%$. При этом данная оценка справедлива для колебаний частотами $f > 3$ kHz, при меньших частотах это значение в разы больше. σ_{dev1} и σ_{dev2} получены путем обратного преобразования Фурье для искусственных сигналов, представленных на рис. 1, с последующим определением среднеквадратического отклонения во временной области. Значение получено путем деления величины σ_{dev1} на линейную плотность плазмы в момент снятия спектра ($nl \sim 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$). Точное значение регистрируемой амплитуды зависит от параметров разряда и от параметров колебания.

Исходя из этих двух ограничивающих факторов, можно оценить характеристики колебаний линейной плотности, которые возможно детектировать с помощью СВЧ-интерферометра (рис. 2) для двух линейных плотностей: среднее значение по проанализированным разрядам — $nl = 2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$, граничное значение линейной плотности, которое позволяет измерять СВЧ-интерферометр, $nl = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$ [13].

На рис. 2 отмечена область измеренных на токамаке Т-15МД низкочастотных МГД-колебаний, а также данные по измерению альфвеновских мод на токамаке JET с помощью микроволнового интерферометра [4], на токамаке DIII-D с помощью лазерного интерферомет-

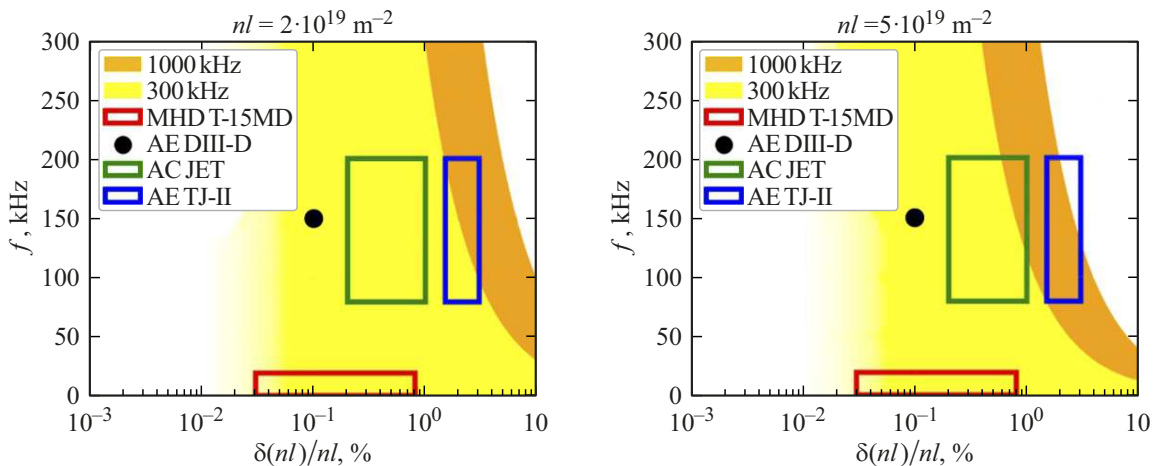


Рис. 2. Параметры колебаний плотности, доступные для измерения с помощью СВЧ-интерферометра. Желтым показана область измеряемых колебаний при использовании ИФ-фильтра 300 kHz, оранжевая область — для ИФ-фильтра 1000 kHz.

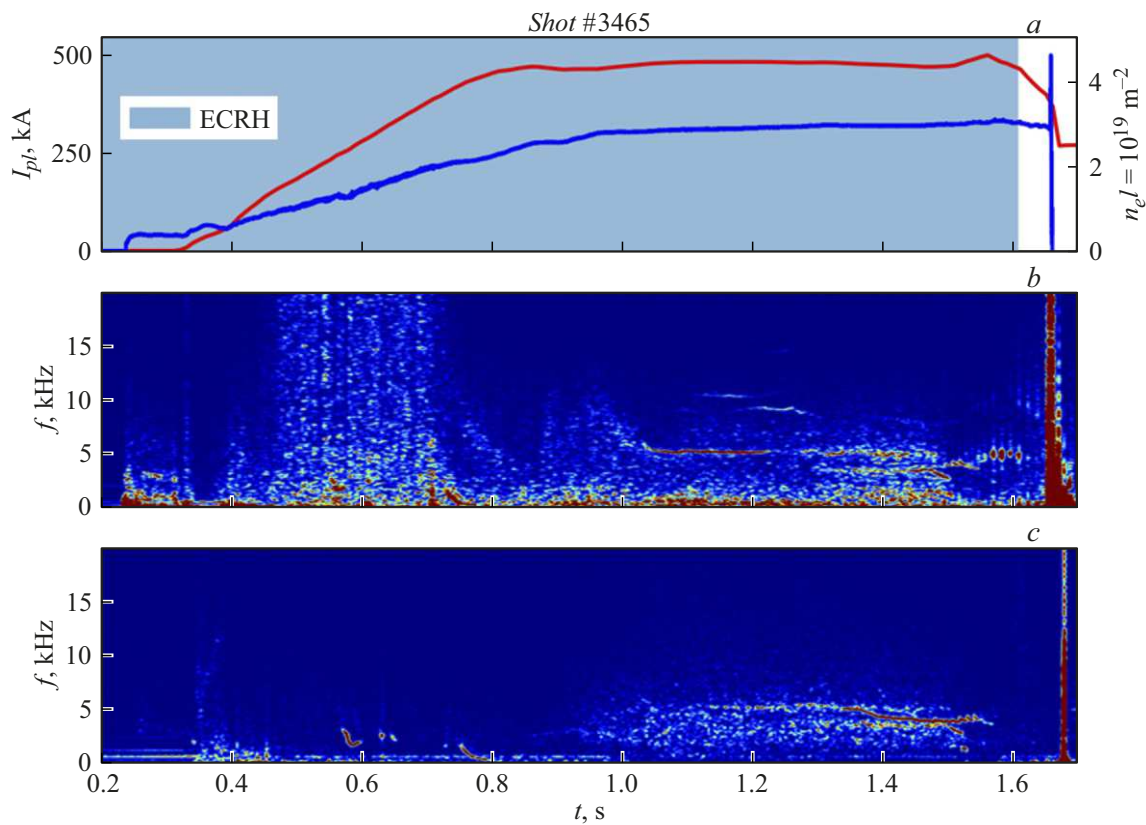


Рис. 3. Временная эволюция тока и линейной плотности (а) плазмы в импульсе № 3465, спектрограммы сигнала СВЧ-интерферометра (b) и электромагнитного зонда (c).

ра [17] и на стеллараторе TJ-II с помощью диагностики НВР [18]. Данный график демонстрирует, что ИФ-фильтр на 300 kHz может ограничивать область измерения высокочастотных колебаний ($f > 100$ kHz) с высокой амплитудой больше 1%.

Параметры исследуемых плазменных разрядов T-15МД близки к параметрам плазмы в стеллараторе TJ-II, при этом ИФ-фильтр 300 kHz лишь частично покрывает область данных с TJ-II. Следовательно, ИФ-фильтр может препятствовать наблюдению альфвеновских колебаний в токамаке T-15МД. Однако возникновение подобных неустойчивостей на хорде зондирования интерферометра приводило бы к сильному ослаблению сигнала ИФ по амплитуде, вызывая сбои в работе СВЧ-интерферометра. В проанализированных экспериментальных данных подобных эффектов не наблюдалось. Тем не менее использование же ИФ-фильтра на 1000 kHz потенциально позволит расширить области измерения таких колебаний. В случае рассмотрения значения граничной линейной плотности $nl = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$ область доступных для наблюдения колебаний значительно уменьшается, однако измерение МГД-колебаний все равно остается возможным.

Отдельно стоит отметить ограничение на возможность детектирования колебаний с точки зрения рефракции электромагнитных волн в плазме. Рефракция не влияет на частоту регистрируемых колебаний, но

может приводить к неточности определения амплитуды колебаний плотности, поскольку при вычислении значений плотности плазмы траектория зондирования считается прямолинейной, а рефракция приводит к ее искривлению. Тем не менее в [13] показано, что ошибка в измерении электронной плотности из-за эффекта рефракции составляет лишь единицы процентов, так как при больших значениях наблюдалось бы пропадание сигнала СВЧ-интерферометра. Также в работе показано, что возможно проводить зондирование плазмы T-15МД СВЧ-интерферометром по вертикальному каналу при плотности на оси $n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$. Приведенные на рис. 2 пределы рассмотрены до значения линейной плотности $nl = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$ что входит в рабочий диапазон СВЧ-интерферометра, поскольку для разрядов в T-15МД характерно $l > 1$ m для хорды зондирования СВЧ-интерферометра.

3. Результаты измерений параметров колебаний плотности плазмы

В качестве экспериментальных данных в настоящей работе анализировались разряды плазмы, полученные в ходе экспериментальных кампаний 2024–2025 гг. на токамаке T-15МД. Исследуемые импульсы характеризовались широкими диапазонами то-

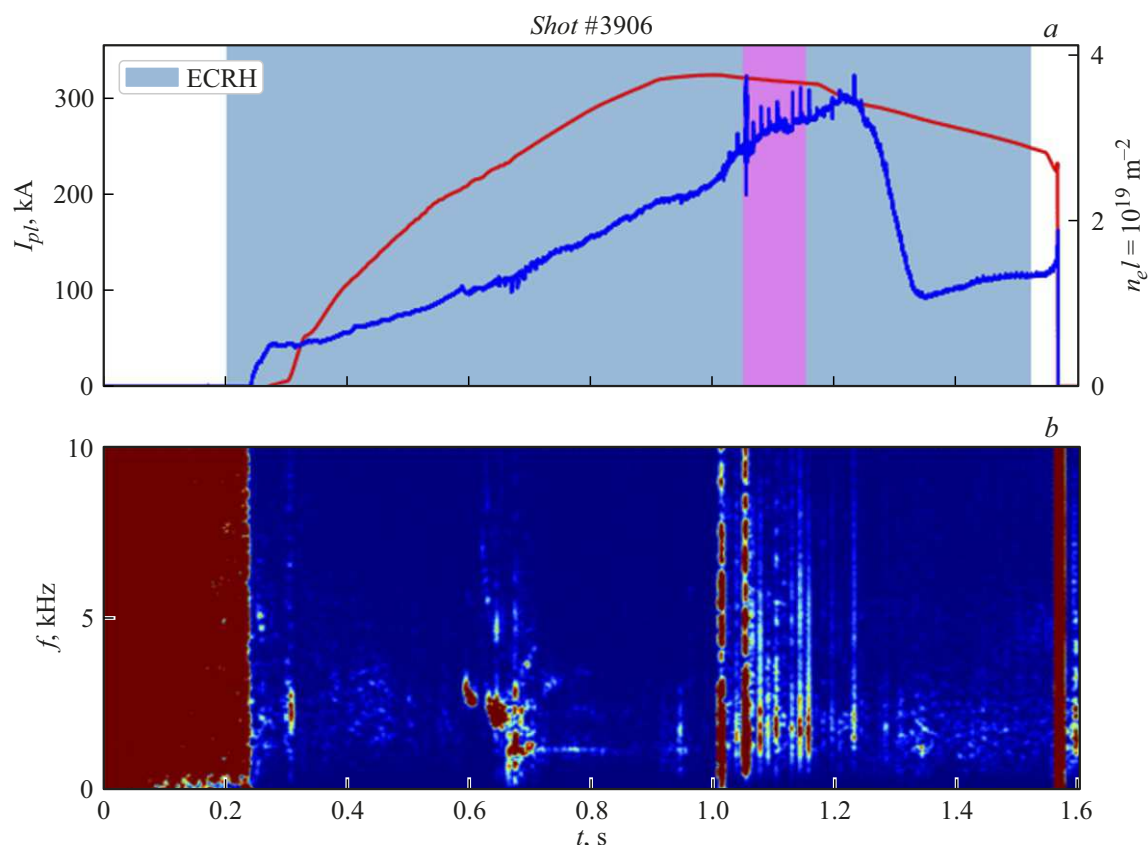


Рис. 4. Временная эволюция параметров плазмы в импульсе № 3906 (а) и спектрограмма сигнала СВЧ-интерферометра (b).

ка плазмы $I_{pl} = 200\text{--}620 \text{ kA}$ и линейной плотности $nl = 1\text{--}3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$. Продолжительность разрядов составляла $t = 500\text{--}2000 \text{ ms}$. Во всех разрядах осуществлялась предыонизация и последующий нагрев с помощью гиротрона мощностью до 1 MW с частотами 82.6 GHz (кампания 2024 г.) и 105 GHz (кампания 2025 г.). Для верификации спектрограмм СВЧ-интерферометра использовались дополнительные данные, полученные с электромагнитной диагностики (ЭМД) токамака Т-15МД [19], а также с системы диагностики мягкого рентгеновского излучения (SXR) [20].

На рис. 3, а представлены временные эволюции основных параметров разряда в импульсе № 3465. В течение разряда на сигнале СВЧ-интерферометра наблюдались низкочастотные МГД-колебания (рис. 3, а), которые также фиксировались МГД зондами токамака Т-15МД (рис. 3, б). На спектрограммах обеих диагностик наблюдаются колебания плазмы с частотой 5–6 kHz, соответствующие МГД-возмущению с полоидальным модовым числом $m = 3$ [21]. Кроме того, спектрограмма СВЧ-интерферометра показывает наличие более высокочастотных возмущений плазмы с частотой, превышающей $f = 10 \text{ kHz}$, которые не наблюдаются в сигналах ЭМД-диагностики.

В импульсе № 3906 имели место пилообразные колебания, которые также наблюдались в сигнале СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД. На рис. 4 представ-

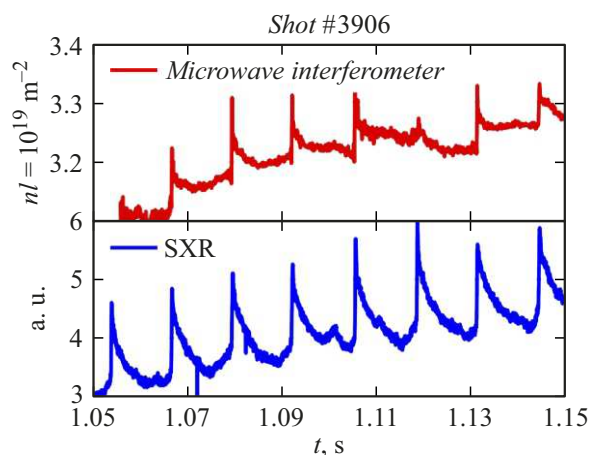


Рис. 5. Пилообразные колебания в сигнале СВЧ-интерферометра и сигнале канала SXR, проходящего через центральную область плазменного шнура.

лены ход тока и линейной плотности плазмы (рис. 4, а) разряда № 3906, а также показана спектрограмма сигнала СВЧ-интерферометра (рис. 4, б).

Для временного промежутка $t = 1.05\text{--}1.15 \text{ s}$ показаны сигнал линейной плотности СВЧ-интерферометра (рис. 5, а) и сигнал канала диагностики мягкого рентгеновского излучения (SXR) (рис. 5, б). Период наблю-

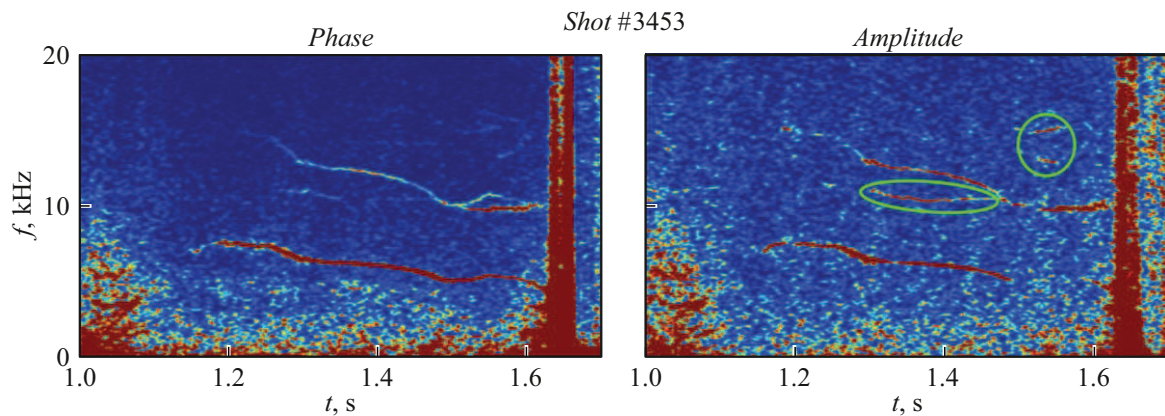


Рис. 6. Спектрограммы фазы и амплитуды ИФ для импульса № 3453. Зеленым цветом отмечены возмущения, которые наблюдаются только в амплитуде сигнала.

даемых пилообразных колебаний $T \sim 13$ ms, величина колебания плотности достигала $\delta(nl)/nl \sim 5\%$.

Анализ экспериментальных данных показал, что с помощью СВЧ-интерферометра были обнаружены МГД-возмущения в частотном диапазоне $f < 15$ kHz и величиной колебания плотности плазмы $\delta(nl)/nl \sim 0.03\% - 5\%$.

Благодаря регистрации сигнала ИФ в системе СВЧ-интерферометра токамака T-15МД, возможно анализировать как данные об электронной линейной плотности плазмы (фазе сигнала), так и амплитуду ИФ. В ходе обработки экспериментальных данных было обнаружено, что для некоторых плазменных импульсов спектральный анализ амплитуды сигнала позволяет получить дополнительную информацию о возмущениях линейной электронной плотности плазмы. На рис. 6 изображены спектрограммы линейной плотности и амплитуды сигнала ИФ для импульса № 3453. На амплитудной спектрограмме были выявлены возмущения, которые не наблюдаются на спектрограмме линейной плотности. Такие особенности могут быть связаны с эффектами от рефракции и изменением поляризации зондирующей волны вследствие эффекта Фарадея, которые заметно сказываются именно на мощности регистрируемой волны СВЧ-интерферометра.

Заключение

Проведено исследование возможностей СВЧ-интерферометра токамака T-15МД для анализа колебаний линейной электронной плотности плазмы. Оценены операционные пределы диагностики. Анализ экспериментальных данных показал, что с помощью СВЧ-интерферометра возможно регистрировать низкочастотные МГД-колебания в диапазоне до 15 kHz с относительными возмущениями плотности в диапазоне $\delta(nl)/nl \sim 0.03\% - 5\%$. Также установлено, что спектральный анализ амплитуды сигнала СВЧ-интерферометра позволяет получать дополнительную

информацию о возмущениях плазмы, что расширяет возможности диагностики.

Показано, что текущий ИФ-фильтр с полосой 300 kHz не ограничивает измерение низкочастотных колебаний (до 50 kHz) в широком диапазоне амплитуд. Однако при частотах выше 100 kHz, например в случае альфвеновских мод, фильтр может подавлять сигнал с большими относительными возмущениями $\delta(nl)/nl > 1\%$, что может препятствовать их регистрации. Использование ИФ-фильтра с более широкой полосой пропускания потенциально позволит расширить возможности диагностики для регистрации высокочастотных колебаний при появлении признаков таковых в сигналах СВЧ-интерферометра.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G.D. Conway. Plasma Phys. Control. Fusion, **50** (12), 124026 (2008). DOI: 10.1088/0741-3335/50/12/124026
- [2] V.A. Vershkov, D.S. Sergeev, G.F. Subbotin, Yu.N. Dnestrovskij, A.V. Danilov, A.V. Melnikov, L.G. Eliseev, S.G. Maltsev, E.P. Gorbunov, D.S. Sergeev, S.V. Krylov, T.B. Myalton, D. Ryzhakov, V.M. Trukhin, V.V. Chistiakov, S.V. Cherkasov. Nucl. Fusion, **55** (6), 063014 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/6/063014
- [3] A.V. Melnikov, L.I. Krupnik, L.G. Eliseev, J.M. Barcala, A. Bravo, A.A. Chmyga, G.N. Deshko, M.A. Drabinskij, C. Hidalgo, P.O. Khabanov. Nucl. Fusion, **57** (7), 072004 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa5382

- [4] S.E. Sharapov, B. Alper, J. Fessey, N.C. Hawkes, N.P. Young, R. Nazikian, G.J. Kramer, D.N. Borba, S. Hacquin, E. De La Luna, S.D. Pinches, J. Rapp, D. Testa. *Phys. Rev. Lett.*, **93**(16), 165001 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.165001
- [5] D. Véron. *Submillimeter interferometry of high-density plasmas*. In: K.J. Button (ed.), *Infrared and Millimeter Waves. V. 2. Instrumentation* (Academic Press, NY., 1979), p. 67–135.
- [6] M. Yoshikawa, Y. Shima, T. Matsumoto, A. Nakahara, N. Yanagi, A. Itakura, H. Hojo, T. Kobayashi, K. Matama, Y. Tatematsu, T. Imai, J. Kohagura, M. Hirata, Y. Nakashima, T. Cho. *Rev. Sci. Instrum.*, **77**(10), 10E906 (2006). DOI: 10.1063/1.2227445
- [7] Y. Zhou, L.-C. Li, Y.-G. Li, Y.-M. Jiao, Z.-C. Deng, J. Yi, Y. Liu, K.-J. Zhao, X.-Q. Ji, B.-B. Peng, Q.-W. Yang, X.-R. Duan, X.-T. Ding. *Chin. Phys. Lett.*, **25**(7), 2558 (2008). DOI: 10.1088/0256-307X/25/7/062
- [8] P.K. Atrey, D. Pujara, S. Mukherjee. *Fusion Eng. Des.*, **130**, (2018). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.03.035
- [9] J. Chen, G. Zhuang, Q. Li, Y. Wang, W. Chen, et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **85**(11), 11D303 (2014). DOI: 10.1063/1.4895390
- [10] P. Shi, Z. Shi, W. Chen, W. Zhong, Z. Yang, M. Jiang, B. Zhang, Y. Li, L. Yu, Z. Liu. *Plasma Sci. Technol.*, **18**(7), 708 (2016). DOI: 10.1088/1009-0630/18/7/02
- [11] P.W. Shi, W. Chen, Z.B. Shi, X.R. Duan, L.M. Yu, W. Zhong, M. Jiang, Z. Yang, J.X. Li, J. Wen, X.T. Ding, Y. Liu, Q.W. Yang. *Phys. Plasmas*, **24**(4), 042509 (2017). DOI: 10.1063/1.4989933
- [12] P. Su, H. Zhong, Y. Tan, Z. Gao, Y. Zai, H. Liu, L. Zeng, X. Zhu, B. Ling, Z. Cheng, W. Liu, S. Wang, B. Wang. *Rev. Sci. Instrum.*, **92**(4), 043538 (2021). DOI: 10.1063/5.0043667
- [13] Д.С. Сергеев, М.Н. Неруш. *ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез*, **43**(2), 49 (2020). DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-49-56
- [14] R.T. Snider. *Application of interferometry and Faraday rotation techniques for density measurements on ITER*. In: *Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors* (Springer US, Boston, MA, 1996), p. 225–233. DOI: 10.1007/978-1-4613-0369-5_27
- [15] P.P. Khvostenko, I.O. Anashkin, E.N. Bondarchuk, N.V. Injutin, V.A. Krylov, I.V. Levin, A.B. Mineev, M. Sokolov. *Probl. At. Sci. Technol. Ser.: Thermonucl. Fusion*, **42**(1), 15 (2019). DOI: 10.1134/S1063778819070078
- [16] A.S. Drozd, D.S. Sergeev, R.A. Begishev, R.A. Begishev, G.B. Igon'kina, M.M. Sokolov, N.V. Korshunov, E.N. Khairutdinov, T.B. Myalton. *Plasma Phys. Rep.*, **50**(5), 568 (2024). DOI: 10.1134/S1063780X24600543
- [17] M.A. Van Zeeland, G.J. Kramer, R. Nazikian, H.L. Berk, T.N. Carlstrom, W.M. Solomon. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **47**(9), L31 (2005). DOI: 10.1088/0741-3335/47/9/L01
- [18] L.G. Eliseev, A.V. Melnikov, S.E. Lysenko. *Rev. Mod. Plasma Phys.*, **6**(1), (2022). DOI: 10.1007/s41614-022-00088-y
- [19] A.V. Sushkov, A.M. Belov, G.B. Igonkina, A.G. Kachkin, E.N. Khayrutdinov, A. Melnikov, M. Sokolov. *Fusion Eng. Des.*, **146**, (2019). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.12.073
- [20] К.А. Рогозин и др. *Многоканальная диагностика мягкого рентгеновского излучения на установке Т-15МД*. В сб.: Тезисы 51-й Междунар. Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС (ICPAF-2024), 18–22 марта 2024), с. 103.
- [21] А.Д. Изарова и др. *Результаты обработки сигналов МГД-диагностики Т-15МД*. В сб.: Тезисы 11-й Междунар. конф. „Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛаПлаз-2025“ (29–31 января 2025), с. 137.